

УДК 621.314.26

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.11

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТРИФАЗНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ СОНЯЧНОЮ БАТАРЕЄЮ

О. О. ШАВЬОЛКІН\*

кафедра електроніки та електротехніки, Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, УКРАЇНА  
\*email: shavolkin@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто принципи формування струму багатофункціонального трифазного перетворювача для комбінованих систем електроживлення локальних об'єктів з фотоелектричною сонячною батареєю та підтриманням близького до одиниці коефіцієнту потужності у точці підключення до мережі за цілодобового використання. Запропоновано використання комбінованої модуляції з релейним регулятором струму, що дозволяє забезпечити відповідні стандартам показники струму мережі із найменшими втратами енергії в ключах. Розроблено структуру керування, що забезпечує реалізацію. Моделювання в системі «мережа–перетворювач–нелінійне навантаження» з оцінкою втрат потужності в ключах за різних принципів формування струму підтверджує ефективність запропонованих рішень.

**Ключові слова:** трирівневий інвертор; силовий активний фільтр; релейний регулятор струму; відхилення струму; однополярна та двополярна модуляція; коефіцієнт гармонік; коефіцієнт потужності; втрати потужності; моделювання.

## IMPROVEMENT OF A THREE-PHASE CONVERTER FOR COMBINED POWER SUPPLY SYSTEMS FOR LOCAL OBJECTS WITH A PHOTOVOLTAIC SOLAR BATTERY

A. SHAVELKIN

Department of Electronics and Electrical Engineering, Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The purpose of the work is to improve the principles of forming the output current of a grid inverter to ensure compliance with the standards of parameters of a grid current without increasing the energy losses in the inverter's keys. The application is considered in a multifunctional three-phase converter with round-the-clock use for combined power supply systems of local objects, which provides a power factor close to unity at the point of connection to the AC grid. The methods of the electric circuit theory were used in combination with computer simulation. The analysis of the known principles of forming of an instantaneous value of output current of inverter by the deviation from the referenced value at a constant and variable key switching frequency is performed. For a grid three-level inverter, the use of combined unipolar and bipolar modulation with a relay current controller is suggested. The structure of the current controller is designed to provide the distribution of the unipolar and bipolar modulation intervals in accordance with the referenced value of inverter current and the mains voltage. A mathematical model is developed for studying the processes in the system, which include "a grid - the converter - non-linear unbalanced load", with an estimate of the power losses in the keys of a grid inverter in accordance with their currents and data sheets used, for a different principles of current formation for a two-level and three-level bridge a grid inverter. The results of the simulation confirm the possibility of ensuring the harmonic composition of the grid current corresponding to the standards with the lowest energy losses in the keys in all modes of the converter operation when using a three-level NPC inverter with clamped diodes. Further improvement in performance is possible when using the structure of three-level TNPC inverters.

**Keywords:** three-level NPC inverter; power active filter; relay current controller; current deviation; unipolar and bipolar modulation; coefficient of harmonics; Power factor; power losses; modeling.

### Вступ

В енергетиці з розподіленими поновлюваними джерелами електроенергії (ПДЕ) застосовуються комбіновані системи електроживлення (КСЕ) з підключенням до централізованої мережі змінного струму (ЦМ). Для ряду локальних об'єктів (мале підприємство, сільськогосподарське підприємство, торговий центр, міні-готель) за достатньо великої потужності електроустаткування в умовах використання існуючих, зношених, перевантажених розподільчих мереж використання ПДЕ дозволяє вирішувати задачу стабільного електропостачання. За

цього використовується трифазна мережа. Навантаження може бути трифазне симетричне, однофазне з несиметрією по фазах і нелінійне. Розподілені генерувальні установки сприяють розвантаженню ЦМ за активної потужності. Перевантаження мереж також обумовлено споживанням реактивної потужності і генерацією вищих гармонік, що характерно для сучасних споживачів. У той же час достатньо дорогі перетворювальні агрегати (ПА) з фотоелектричними сонячними батареями (СБ) використовуються тільки в денний час і завантажені по максимуму тільки влітку в години найбільшої сонячної активності.

Підвищення ефективності ПА з СБ пов'язують з поєднанням мережевим автономним інвертором напруги (АІН) функції силового активного фільтру (САФ) для компенсації впливу на ЦМ власного навантаження об'єкта за цілодобовим використанням. Так, у роботах [4, 5] розглядається схема з трифазним дворівневим мостовим АІН і симетричним, в тому числі, нелінійним, навантаженням. В [3] аналогічне рішення з тривірневим АІН. Однак для несиметричного навантаження функція САФ у цих схемах неможлива, як неможлива і реалізація автономного режиму роботи у разі відключення ЦМ. Як вирішення питання, в [2] запропоновано використання дворівневого мосту з додатковим (четвертим) плечем, середній вивід якого з'єднано з нейтраллю ЦМ. В роботі [1] використовується дворівневий трифазний міст зі з'єднанням середнього виводу ємнісного розподільювача на вході інвертора з нейтраллю. В роботі [7] в якості мережевого АІН розглянуто використання тривірневого NPC АІН із з'єднанням нульового виводу АІН з нейтраллю ЦМ.

За цього формування вихідного струму АІН здійснюється в замкнутій за відхиленням миттєвого значення струму  $\Delta i = i_{iH}^* - i_{iH}$  ( $i_{iH}^*$ ,  $i_{iH}$  – відповідно, задане і фактичне значення струму) системі регулювання, що забезпечує високу швидкість і якість відпрацювання  $i_{iH}^*$ . В КСЕ струм мережі  $i_l$  визначається різницею струмів АІН і навантаження  $i_{iH}$ , для забезпечення його якості, спотворення струму  $i_{iH}$  повинні бути мінімальними у всьому діапазоні регулювання. Щодо дворівневого мостового АІН фактично маємо три напівмостові схеми - плечі моста і можлива лише двополярна модуляція, яка виключає проблеми щодо формування струму. Для тривірневого АІН перевагу віддають однополярній модуляції з постійною частотою перемикачів ключів. Проте існують певні проблеми при формуванні струму, що потребує достатньої складної корекції [6]. У разі релейного регулятора струму (РРС) частота перемикачів є змінною, в [8] запропоновано варіант з постійною частотою. Отже питання формування вихідного струму трифазних мережевих АІН потребує додаткового вивчення і удосконалення. За цього в якості критерію слід розглядати гармонійний склад струму (THD) в точці підключення ПА до ЦМ і забезпечення високого ККД АІН.

### Мета роботи

Удосконалення принципів формування вихідного струму мережевого АІН трифазного ПА для КСЕ локального об'єкта, що забезпечать відповідність стандартам показників струму мережі без збільшення втрат енергії в ключах інвертора.

### Викладення основного матеріалу

Розглянемо особливості формування струму в КСЕ на прикладі тривірневого АІН. У разі з'єднання

середнього виводу АІН з нейтраллю ЦМ (на рис. 1 показана одна фаза) робота фаз є незалежною. Вважаємо, що амплітуда активної складової струму ЦМ (за близького до одиниці коефіцієнту потужності – це струм ЦМ) визначається зовнішнім регулятором напруги на вході АІН. За допомогою датчиків струму (ДС) вимірюються струми навантаження  $i_H$  та вихідний АІН  $i_{iH}$ . Ємнісний струм фільтру ( $C_\Phi$ ,  $R_\Phi$ )  $i_C$  є постійним. Струм мережі з напругою  $u_l$ :  $i_l = i_l^l + i_C = i_C + i_H + i_{iH}$ .

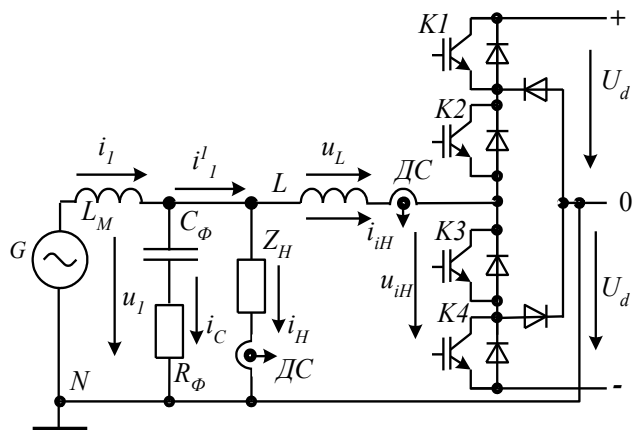


Рис. 1 – Структура фази перетворювача з підключенням до мережі та навантаження

Струм АІН  $i_{iH}$  визначається рівнянням

$$u_L = L \frac{di_{iH}}{dt} = u_l - u_{iH},$$

де  $u_{iH}$  - вихідна напруга АІН, що приймає значення 0 та  $\pm U_d$ ,  $U_d \geq a U_{l\Phi m}$  – напруга на вході АІН,  $U_{l\Phi m}$  – амплітуда фазної напруги ЦМ,  $a \geq 1$  [6, 7] і визначається індуктивністю реактора  $L$ , частотою модуляції  $f_m$ , амплітудою пульсацій струму  $\Delta I_{iHm}$ .

За однополярної модуляції по чергову використовуються стани, коли  $u_{iH}$  дорівнює 0,  $+U_d$  або 0,  $-U_d$ . Розглянемо роботу схеми у основних режимах: а) потужність, що генерується СБ ( $P_{CB}$ ) перевищує активну потужність навантаження ( $P_H$ ) і активна потужність генерується в ЦМ (векторна діаграма на рис.2, а); б)  $P_H > P_{CB}$  (рис. 2,б) активна потужність споживається з ЦМ; в) «нічний» режим  $P_{CB} = 0$  (рис. 2, в) АІН виконує функцію САФ.

Отже, маємо зсув за фазою першої гармоніки струму АІН  $i_{iH(1)}$  відносно напруги мережі і, відповідно, інтервали часу (відповідають куту  $\alpha$  на рис. 2, а), коли полярності  $i_{iH(1)}$  і  $u_l$  співпадають. За цього стан  $u_{iH} = 0$  не завжди забезпечує потрібну швидкість змінювання струму АІН. Це обумовлює спотворення форми струму АІН і збільшення амплітуди вищих гармонік низького порядку і, як наслідок, збільшення THD струму мережі. В певній мірі це питання вирішується використанням достатньої складної в реалізації корекції [6] при постійній частоті модуляції.

Що стосується використання PPC, основною проблемою є змінна частота перемикачів ключів, що ускладнює фільтрацію вищих гармонік. В даному використанні, наприклад, за  $a=1.4$  співвідношення  $f_{MAX}/f_{MIN}=a/(a-1)=3.5$ . Якщо  $f_{MAX} \geq 20$  кГц [9], то значення  $f_{MIN} \geq 5.71$  кГц, що є припустимим. Вирішення питання щодо формування струму можна здійснити використанням біполярної модуляції на інтервалах, що відповідають  $a$ . У випадках на рис.2 струм  $i_{H(1)}$  має реактивну ємнісну складову. За відсутності навантаження ( $i_{H(1)}=0$ ) і активного навантаження характер реактивної складової струму АІН стає індуктивним. В загальному випадку  $\alpha < \pm\pi/2$ . Відповідні інтервали часу визначаються згідно  $u_1$  та  $i_{IH}^*$ . Додатковою умовою є обмеження мінімального значення  $\alpha \geq \arcsin(a-1)$  за симетрією відносно моменту часу, коли  $u_1=0$ .

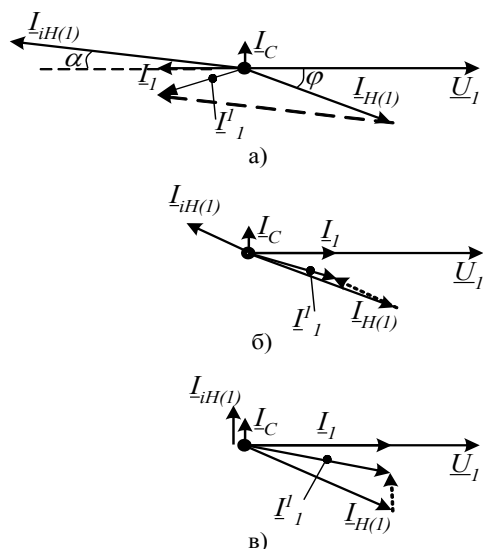


Рис. 2 – Векторні діаграми струмів за різних режимів роботи

Запропонована структура системи керування струмом АІН (рис. 3) містить перетворювач координат ПК, релейні елементи РЕ з заданим відхиленням  $\delta$  та розподільвач імпульсів РІ.

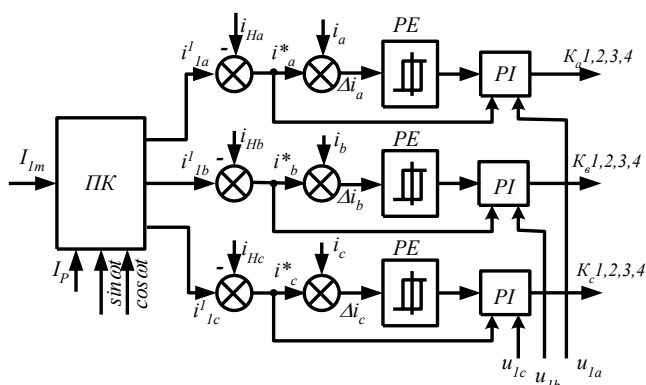


Рис. 3 – Система керування струмом АІН

## Обговорення результатів

Для моделювання використовувався програмний пакет Matlab. Моделювання системи «ЦМ - мережевий перетворювач з СБ - навантаження» здійснено за нелінійного навантаження, що містить випрямляч з вихідним ємнісним фільтром і  $RL$ -навантаження. Модель ЦМ (380/220 В) містить опір мережі  $R=0.02$  Ом,  $X_L=0.02$  Ом, фільтр  $R_\phi=0.3$  Ом,  $C_\phi=60$  мкФ,  $L=4.2$  мГн,  $U_d=435$  В. Розроблена модель для визначення втрат енергії в ключах базується на миттєвих значеннях струмів ключів в загальній моделі перетворювача і каталожних даних обраних приладів, які задаються в табличній формі. За цього втрати провідності визначаються як середнє за період  $T$  вихідної частоти значення миттєвої потужності на приладі  $P_C = \frac{1}{T} \int_0^T u_V i_V dt$  ( $u_V$ ,  $i_V$  – миттєві значення

напруги (розраховується відповідно до вихідної вольт-амперної характеристики) і струму). Втрати перемикачів визначаються відповідно до миттєвих значень струму в момент перемикачів, виходячи з залежностей  $E_{on}=f(i_V)$  і  $E_{off}=f(i_V)$ . Розглянуто використання в схемі трирівневого АІН IGBT модуля (плече мосту) типа SK 35MLI12T4Tr [10] з  $U_{CE}=1.2$  кВ,  $I_{C25^\circ(70^\circ)}=43(35)$  А. Дослідження виконано для однополярної модуляції [6] з  $f_M=20$  кГц,  $\Delta I_{mMAX}=0.8$  А і для PPC з комбінованою модуляцією за  $\delta=1$  А (в табл.1 знак «-» для  $I_{m(1)}$  відповідає споживанню енергії з ЦМ. Навантаження нелінійне, зсув за першою гармонікою  $\varphi_{(1)}=31.2^\circ$ ).

Таблиця 1 – Зіставлення показників за різних принципів формування струму

| $I_{m(1)}$ ,<br>А | Однополярна модуляція з $f_M=const$ |               | Комбінована модуляція |               | $I_{Hm(1)}$ ,<br>А |
|-------------------|-------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------|--------------------|
|                   | THD, %                              | $\eta$ , в.о. | THD, %                | $\eta$ , в.о. |                    |
| 3                 | 2.5                                 | 0.9           | 3.8                   | 0.89          | 0                  |
| 3                 | 4.45                                | 0.96          | 4                     | 0.972         | 14.4               |
| 6                 | 2.27                                | 0.96          | 2.05                  | 0.971         | 14.4               |
| 12                | 1.1                                 | 0.959         | 1.05                  | 0.97          | 14.4               |
| -6                | 2.27                                | 0.963         | 1.84                  | 0.972         | 14.4               |

Осцилограми струмів і напруги для фази  $a$  перетворювача з  $RL$ -навантаженням і однофазним випрямлячем наведені на рис.4,а у разі генерації енергії у ЦМ. Незалежно від навантаження в точці підключення до ЦМ підтримується симетричне завантаження за струмом з коефіцієнтом потужності близьким до 1 (на рис.4,б осцилограми наведені для навантаження з трифазним випрямлячем,  $RL$ -навантаження одної з фаз вимкнено).

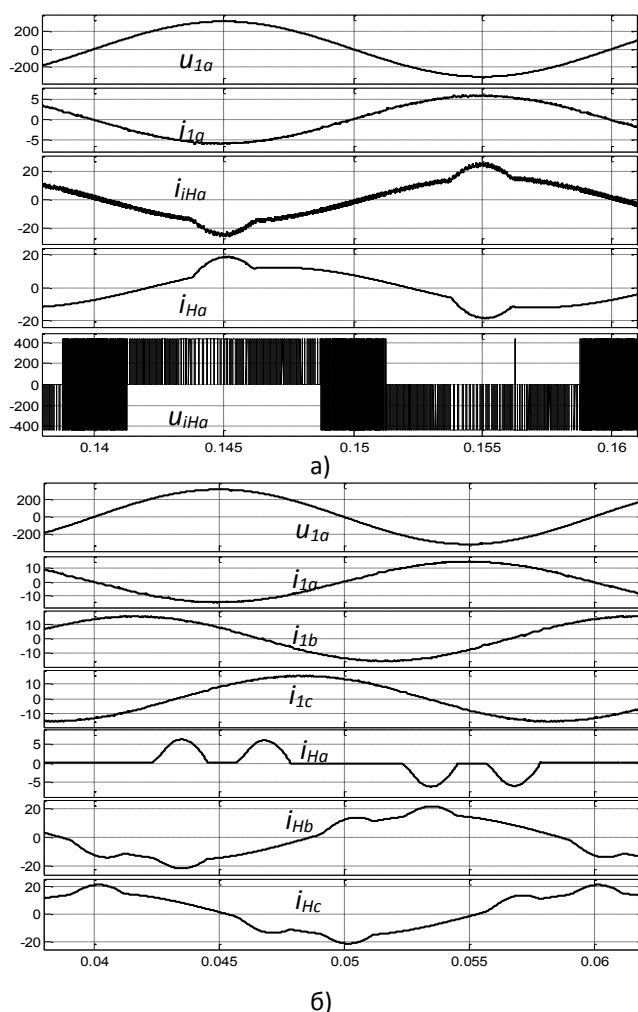


Рис. 4 – Осцилограми напруги і струмів для:  
а) однофазного режиму з RL - навантаженням і випрямлячем; б) трифазного випрямляча, коли RL – навантаження в фазі а вимкнено

### Висновки

Запропоновано для формування струму трирівневого АІН використання комбінованої однополярної та двополярної модуляції, що забезпечує ефективне придушення вищих гармонік низького порядку струму мережі. За однакових параметрів силових кіл використання релейного регулятора струму з комбінованою модуляцією дозволяє забезпечити кращі показники струму мережі при найменших втратах енергії в ключах. Запропонована структура контуру регулювання струму з визначенням інтервалів, де використовується відповідний тип модуляції згідно напрузі мережі і завданню струму АІН. За суміщенням функції САФ використання дворівневого мостового АІН з середнім виводом джерела постійного струму на існуючих ключах (IGBT) з біполярною модуляцією не дозволяє забезпечити ККД вище 0.96. Перспективним рішенням для використання в КСЕ є схема трирівневого АІН і її сучасні модифікації без

фіксувальних діодів. Це потребує подальшої проробки системи керування для практичної реалізації у багатофункціональних трифазних перетворювачах для КСЕ.

### Список літератури

1. **Vigneysh, T.** Grid interconnection of renewable energy sources using multifunctional grid-interactive converters: A fuzzy logic based approach / **T. Vigneysh, N. Kumarappan** // *Electric Power Systems Research* 151. – 2017. – P. 359-368. – doi:10.1016/j.epsr.2017.06.010.
2. **Ruben, Lliuyacc.** Grid-forming VSC control in four-wire systems with unbalanced Nonlinear loads / **Ruben Lliuyacc, Juan M. Mauricio, Antonio Gomez-Exposito, Mehdi Savaghebi, Josep M. Guerrero.** // *Electric Power Systems Research.* – 152. – 2017. – P. 249-256. – doi: 10.1016/j.epsr.2017.07.010.
3. **Edris, Pouresmaeil.** Control Scheme of Three-Level NPC Inverter for Integration of Renewable EnergyResources into AC Grid /**Edris Pouresmaeil, Daniel Montesinos-Miracle**// *IEEE Systems Journal.* – 2012. – V. 6, 2. – P. 242-253. – doi: 10.1109/JSYST.2011.2162922.
4. **Pouresmaeil, Edris.** A Control Technique for Integration of DG Units to the Electrical Networks / **Edris Pouresmaeil, Carlos Miguel-Espinar, Miquel Massot-Campos, Daniel Montesinos-Miracle, Oriol Gomis-Bellmunt** // *IEEE Transactions On Industrial Electronics.* – 2013. – V. 60, 7. – 2881-2893. – doi: 10.1109/TIE.2012.2209616.
5. **Tsengenes, Georgios.** Investigation of the behavior of a three phase grid-connected photovoltaic system to control active and reactive power / **Georgios Tsengenes, Georgios Adamidis** // *Electric Power Systems Research.* – 2011. – 81. – 177-184. – doi:10.1016/j.epsr.2010.08.008.
6. **Шавєлкін, А. А.** Структуры однофазных преобразовательных агрегатов для комбинированных систем электроснабжения с фотоэлектрическими солнечными батареями / **А. А. Шавєлкін** // «Технічна електродинаміка» ІЗД НАН України. – 2018. – № 2.Р. 39 – 46. – doi: 10.15407/techne2018.02.039.
7. **Шавьолкін, О. О.** Трифазний перетворювальний агрегат для комбінованих систем електроживлення локальних об'єктів з фотоелектричною сонячною батареєю / **О. О. Шавьолкін, Б. В. Солонуха** // *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Електротехніка і енергетика* №1 (18). – 2017. – С. 45-53.
8. **Mao, Huifeng** A Hysteresis Current Controller for Single-Phase Three-Level Voltage Source Inverters / **Huifeng Mao, Xu Yang, Zenglu Chen, Zhaoan Wang** // *IEEE Transactions On Power Electronics.* – 2012. – V. 27, 7. – P. 3330-3339. – doi 10.1109/TPEL.2011.2181419.
9. **Плушке, Н.** Специализированные модули для трехуровневых инверторов / **Н. Плушке, Т. Грашкоф, А. Колпаков** // *Силовая электроника.* – ООО «Медиа КиТ». – 2010. – №2 (25). – С. 44-47.
10. SEMIKRON IGBT modules. <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbtmodules.html>.

### Bibliography (transliterated)

1. **Vigneysh, T., Kumarappan, N.** Grid interconnection of renewable energy sources using multifunctional grid-interactive converters: A fuzzy logic based approach. *Electric Power Systems Research*, 2017, **151**, 359-368, doi: 10.1016/j.epsr. 2017.06.010.

2. Ruben, Lliuyacc, Juan, M. Mauricio, Antonio Gomez-Exposito, Mehdi, Savaghebi, Josep M. Guerrero. Grid-forming VSC control in four-wire systems with unbalanced Nonlinear loads. *Electric Power Systems Research*, 2017, **152**, 249–256, doi:10.1016/j.epsr.2017.07.010.
3. Edris, Pouresmaeil, Daniel, Montesinos-Miracle. Control Scheme of Three-Level NPC Inverter for Integration of Renewable Energy Resources into AC Grid. *IEEE Systems Journal*, 2012, **6**, 2, 242–253, doi: 10.1109/JSYST.2011.2162922.
4. Edris, Pouresmaeil, Carlos, Miguel-Espinar, Miquel, Massot-Campos, Daniel, Montesinos-Miracle, Oriol, Gomis-Bellmunt. A Control Technique for Integration of DG Units to the Electrical Networks. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2013, **60**, 7, 2881–2893, doi: 10.1109/TIE.2012.2209616.
5. Georgios, Tsengenes, Georgios, Adamidis. Investigation of the behavior of a three phase grid-connected photovoltaic system to control active and reactive power. *Electric Power Systems Research*, 2011, **81**, 177–184, doi:10.1016/j.epsr.2010.08.008.
6. Shavelkin, A. A. Структуры одnofазных преобразователей агрегатов для комбинированных систем электроснабжения с фотоэлектрическими полнечными батареями [Structures of single-phase converter units for combined power supply systems with photovoltaic solar cells]. *Tekhnichna yelektrodinamika [Technical electrodynamics]* IED NAS of Ukraine, 2018, **2**, 39–46, doi: 10.15407/techned2018.02.039.
7. Shavelkin, A. A., Solonukha, B. V. Tryfaznyy peretvoryval'nyy ahrehat dlya kombinovanykh system elektrozhivleniya lokal'nykh ob'yektiv z fotoelektrychnoyu sonyachnoyu batareyeyu [Three-phase transformer unit for combined power supply systems of local objects with photovoltaic solar battery]. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: «Elektrotehnika i enerhetyka» [Scientific works of DonNTU. Series: "Electrical engineering and power engineering"]*, 2017, **1**, 18, 45–53.
8. Huifeng, Mao, Xu, Yang, Zenglu, Chen, Zhaoan, Wang. A Hysteresis Current Controller for Single-Phase Three-Level Voltage Source Inverters. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 2012, **27**, 7, 3330–3339, doi: 10.1109/TPEL.2011.2181419.
9. Plushke, N., Grashkof, T., Kolpakov, A. Spetsializirovannyye moduli dlya trekhurovnevnykh invertorov [Specialized modules for three-level inverters]. *Silovaya elektronika [Power electronics]*, OOO «Media KiT», 2010, **2**, 25, 44–47.
10. SEMIKRON IGBT modules. <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbtmodules.html>.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Шавьолкін Олександр Олексійович** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, професор кафедри електроніка та електротехніка; г. Київ, Україна; e-mail: shavolkin@gmail.com.

**Alexandr Shavelkin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Technologies and Design, Professor of Department of Electronics and Electrical Engineering; Kyiv, Ukraine; e-mail: shavolkin@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Шавьолкін, О. О.** Удосконалення трифазного перетворювача для комбінованих систем електроживлення локальних об'єктів з фотоелектричною сонячною батареєю / **О. О. Шавьолкін** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 75–79. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.11.

*Please cite this article as:*

**Shavelkin, A.** Improvement of a three-phase converter for combined power supply systems for local objects with a photovoltaic solar battery. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **26** (1302), 1, 75–79, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.11.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Шавьолкін, А. А.** Совершенствование трехфазного преобразователя для комбинированных систем электроснабжения локальных объектов с фотоэлектрической солнечной батареей / **А. А. Шавьолкін** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 75–79. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.11.

**АННОТАЦІЯ** Рассмотрены принципы формирования тока многофункционального трехфазного преобразователя для комбинированных систем электроснабжения локальных объектов с фотоэлектрической солнечной батареей и поддержанием близкого к единице коэффициента мощности в точке подключения к сети при круглосуточном использовании. Предложено использование комбинированной модуляции с релейным регулятором тока, что позволяет во всех режимах обеспечить соответствующие стандартам показатели тока сети с наименьшими потерями энергии в ключах. Разработана структура управления, обеспечивающая реализацию. Моделирование в системе «сеть-преобразователь-нелинейная нагрузка» с оценкой потерь мощности в ключах при различных принципах формирования тока подтверждает эффективность предложенных решений.

**Ключевые слова:** трехуровневый инвертор; силовой активный фильтр; релейный регулятор тока; отклонение тока; однополярная и двухполярная модуляция; коэффициент гармоник; коэффициент мощности; потери мощности; моделирование.

Надійшла (received) 15.06.2018